

УДК 553.411+546.59

## НОВЫЙ СПОСОБ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ И ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЗОЛОТА ИЗ ГРАФИТОВЫХ РУД ТУРГЕНЕВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ, ПРИМОРЬЕ

© 2008 г. Академик А. И. Ханчук, М. А. Медков, Л. П. Плюснина, В. П. Молчанов

Поступило 03.06.2008 г.

В последние десятилетия открыто немало месторождений благородных металлов в углеродистых толщах Восточной Сибири и Дальнего Востока, промышленное освоение которых сдерживается отсутствием технологических методов извлечения из них благородных металлов (БМ). К таким объектам относятся графитизированные метаморфические комплексы северной части Ханкайского террейна. В пределах известных ранее месторождений графита Тамгино-Тургеневской группы были установлены повышенные концентрации золота и платины [1, 2]. В данном комплексе пород выделяется ранний этап регионального метаморфизма в условиях от эпидот-амфиболитовой до амфиболитовой фации, возраст которого 730 млн. лет [3]. Поздний этап метаморфизма от зеленосланцевой до гранулитовой фации связан с коллизионными событиями на рубеже кембрия и ордовика. С последними связано проявление региональной графитовой минерализации, сосредоточенной в пределах полосы, вытянутой в субмеридиональном направлении примерно на 100 км при ширине 3–4 км. Наиболее крупными объектами этой площади являются Тамгинское, Тургеневское и Иннокентьевское месторождения графита (рис. 1). Установлена тесная связь минерализации БМ с проявлением графитизации на площади Тургеневского месторождения [1, 2]. Это подтверждается измеренной экспериментально высокой сорбционной емкостью графита в отношении золота и платины [4]. Известно, что БМ образуют устойчивые металлоорганические комплексы и это затрудняет их извлечение из углеродистых пород. В ходе экспериментального изучения хемосорбции золота и платины на графит получены данные о замещении водородных вакансий в ароматическом коль-

це металлами. Возникающие при этом металлоуглеродные связи являются наиболее устойчивыми, что еще более затрудняет выделение металлов при обогащении. Помимо этого графит является химически термостойким минералом и относится к упорным видам сырья, что дополнительно осложняет задачу извлечения БМ из породных пород.

Целью данной работы является разработка способов извлечения золота из графитосодержащих руд Тургеневского месторождения. Для этого было необходимо решить задачу концентрирования тонкого и ультратонкого золота из углеродистых пород. Графит в рудах изученных пород присутствует как в мономинеральных жилах и линзах, так и в рассеянном дисперсном состоянии. Характерно проявление графитизации во всех разностях пород изученного комплекса: кристаллосланцах, плагиогнейсах и гранито-гнейсах, гра-

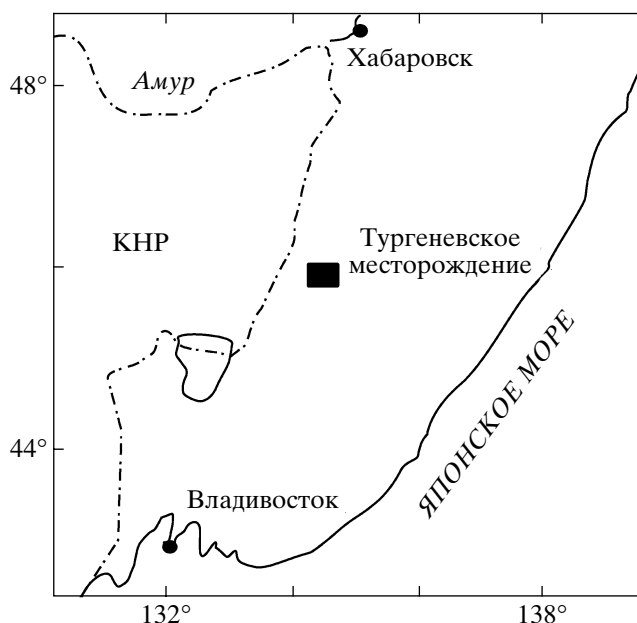


Рис. 1. Местоположение Тургеневского месторождения графита.

Дальневосточный геологический институт  
Дальневосточного отделения  
Российской Академии наук, Владивосток  
Институт химии Дальневосточного отделения  
Российской Академии наук, Владивосток

нитах, дайках лампрофиров, мраморах и скарнах. Наиболее обильная графитизация с образованием графитистых метасоматитов наблюдается по плоскостям сланцеватости гранито-гнейсов, что позволило сделать вывод об эндогенном характере графитизации [2].

Изучение графита на атомно-силовом микроскопе показало его глобулярную микроструктуру. ИК-спектметрия подтвердила отсутствие аморфного углерода, что объясняется высокой степенью метаморфизма изученных пород при температурах порядка 450–620°C [1, 2]. Наряду с связанным невидимым золотом в графитовой руде присутствует микроскопическое самородное золото в виде зерен размером 70–100 мкм, имеющих сфероидную, реже пластинчатую форму. При этом наблюдаются срастания графита с видимым золотом (рис. 2). Анализ состава золота и графита на сканирующем электронном микроскопе показал, что золото в этом случае имеет высокие значения пробности с переменным содержанием, мас. %: Au 93.3–100; Ag 0 – 3.5; Cu 0–6.2. Анализ состава графита, включенного в сфероид, обнаружил присутствие Cl (0.25–2.5), O (27.4–28.4), K (0.2–1.7), Si (0.3–0.5), Au (0.5–2.1) при содержании C 67–71.6 мас. %. Такой состав графита отражает химический состав высокотемпературного метаморфического флюида. Неоднородность состава золота и графита при съемке в разных точках кристаллов, глобулярная микро-

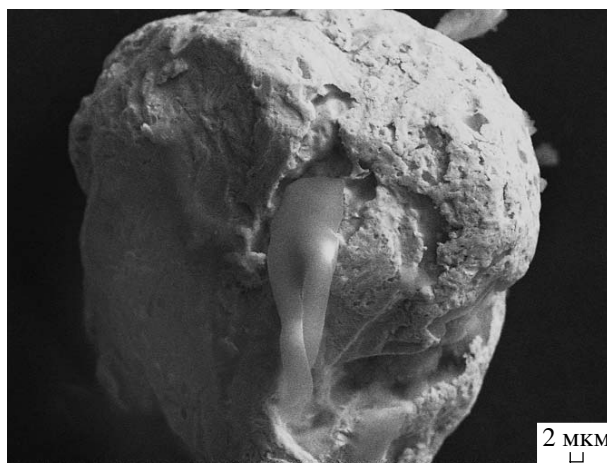


Рис. 2. Сфероид самородного золота с включением графита.

структура графита свидетельствуют об их кристаллизации из газового флюида при участии хлоридной компоненты и кислорода в газовом транспорте металлов [5].

Для проведения технологических экспериментов по концентрированию золота были взяты пробы графитсодержащих пород, составы которых приведены в табл. 1. Содержание золота в них (г/т) предварительно определялось методом атомно-эмиссионной спектроскопии с предвари-

Таблица 1. Химический состав пород (мас. %) в пробах, используемых в технологическом эксперименте по концентрированию золота

Компонент	МТ-04/50	МТ-04/34	МТ-03/1а	МТ-03/3	МТ-04/29
SiO <sub>2</sub>	70.82	50.52	38.61	38.56	43.07
TiO <sub>2</sub>	0.22	1.23	0.02	0.32	0.39
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.61	13.99	20.19	8.95	5.56
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.32	0.69	0.69	2.18	0.36
FeO	0.26	7.08	0.64	0.85	3.97
MnO	0.02	0.13	0.02	0.06	0.13
MgO	0.32	8.86	0.56	2.16	1.53
CaO	3.04	9.96	4.12	2.51	25.24
Na <sub>2</sub> O	0.95	1.84	2.18	1.83	0.49
K <sub>2</sub> O	7.9	3.02	2.92	1.58	0.15
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		0.62		Сл.	0.43
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	0.1	Сл.	0.2	5.97	Сл.
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	0.98	1.15	2.16		3.98
C	2.08	0.53	27.41	34.57	13.95
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0.3			0.26
Сумма	99.62	99.65	99.72	99.54	99.51

Примечание. Проба 04/50 – графитизированный лейкократовый гранито-гнейс; 04/34 – лампрофир; 03/1а – графитовый метасоматит по биотитовому гранито-гнейсу; 03/3 – биотит-полевошпатовый сланец; 04/29 – кварц-карбонат-графитовый метасоматит. Анализы выполнены в ДВГИ ДВО РАН.

**Таблица 2.** Результаты экспериментальной флотации крупнообъемных проб

№ пробы	$\tau$ , мин	Продукт	Выход, %	Содержание Au, г/т	Извлечение Au, %
MT-04/34	20	Пенный	20.8	6.68	92.6
		Камерный	79.2	0.14	7.4
		Исходный	100	1.5	100
MT-04/34a	20	Пенный	36.1	4.32	69.9
		Камерный	63.9	1.05	30.1
		Исходный	100	2.23	100
MT-04/34a	30	Пенный	52.0	3.7	87.3
		Камерный	48	0.64	13.7
		Исходный	100	2.23	100
MT-04/29	10	Пенный	11.5	3.1	23.8
		Камерный	88.5	1.29	76.2
		Исходный	100	1.5	100
MT-04/50	30	Пенный	50.4	12.1	11.1
		Камерный	49.6	98.6	88.9
		Исходный	100	55.0	100

Примечание. Содержания Au определены методом нейтроно-активационного анализа с калифорниевым источником в ИХ ДВО РАН.

тельным фторидным разложением в Институте неорганической химии СО РАН: проба 04/29 – 1.45, 04/34 – 1.5, 04/34a – 2.23. Анализ золота физическими методами ионной масс-спектрометрии (IMS) и нейтроно-активационным (NAA) в Институте химии ДВО РАН показал более высокие значения концентраций Au: 04/29 – 15.2 (NAA), 15.0 (IMS), 04/50 – 55 г/т (NAA). Подобное расхождение в результатах анализа золота различными методами обусловлено значительными потерями в ходе химической подготовки проб за счет выделения летучих металлорганических комплексов. Ранее было отмечено, что оптимальные содержания золота устанавливаются физическими методами, не требующими предварительного химического разложения [2].

При разработке схемы извлечения золота из проб массой 50 кг использовали предварительное измельчение до размеров 0.044 мм, а затем флотировали на лабораторной флотомашине в течение одной стадии продолжительностью от 10 до 30 мин без перечистки и контрольной флотации. Сосновое масло использовали в качестве вспенивателя, а длинноцепочечный амин – в качестве собирателя. Поскольку ультратонкое и связанное золото обладает высокой плавучестью [6], то в разных пробах концентрация Au в пенном и камерном продукте варьировала в зависимости от размерности дисперсного золота (табл. 2). Магнитная и электромагнитная сепарация хвостов флотации пробы 04/50 с высоким содержанием Au позволила получить концентрат с содержа-

нием Au 253.6 г/т. При флотации пробы 04/34a основная масса золота перешла в пенный продукт и получен флотационный концентрат с содержанием Au 6.2 г/т.

Извлечение золота из углеродсодержащих концентратов представляет достаточно трудную задачу. Сорбция золота из цианистых растворов на различных углеродных материалах изучена достаточно полно. В качестве замены цианидов было предложено использовать для выщелачивания золота из концентратов кислые растворы тиомочевины [7]. Для изучения потерь золота и тиомочевины при выщелачивании графитсодержащих концентратов использован эксперимент с модельной системой. С этой целью в 50 г пробы (04/33) вводили дополнительное количество золота в виде золотоносного концентрата. Эту смесь выщелачивали раствором, содержащим 100 г/л тиомочевины, 10 г/л серной кислоты, 20 г/л персульфата аммония при комнатной температуре в течение 5 ч. Затем кек промывали вначале исходным раствором тиомочевины, а затем водой. Результаты опытов показали, что потери золота и тиомочевины при выщелачивании не наблюдались (табл. 3).

Отсюда следует, что кислые растворы тиомочевины предпочтительнее цианистых растворов при выщелачивании золота из концентратов с высоким содержанием углерода. Для концентрирования золота из проб с низким содержанием золота (04/34a) использовали метод фторирования гидрофторидом аммония при нагревании со ско-

**Таблица 3.** Результаты выщелачивания пробы МТ-03/03 раствором тиомочевины

Исходный материал	Концентрация Au в растворе выщелачивания, г/л	Извлечение Au в раствор, %	Концентрация тиомочевины в растворе выщелачивания, г/л
50 г пробы + 50 г золотоносного концентрата	0.098	89.9	49.47
100 г золотоносного концентрата	0.194	89.2	49.5

ростью 2 град/мин до температуры 600°C. Из пульпы путем декантации выделен осадок, выход которого составил 16.5% исходной массы. Содержание Au в нем составило 38 против 6.2 г/т в исходной пробе.

Таким образом, экспериментально подтверждено влияние размера микроскопического, тонкого и ультратонкого золота на способ его извлечения из углеродистых пород. Впервые предложен более перспективный с точки зрения экологии метод использования тиомочевины для концентрирования золота вместо обычно применяемых в золотодобыче цианидов. Представленные способы извлечения золота из графитовой руды могут быть успешно использованы для создания малоотходной технологии переработки минерального сырья.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов ДВО РАН: проекты № 15-ИН-07, 06-3-А-08-235, 06-2-СО-08-029, 06-1-ОХНМ-134.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ханчук А.И., Плюснина Л.П., Молчанов В.П. // ДАН. 2004. Т. 397. № 4. С. 524–529.
2. Ханчук А.И., Плюснина Л.П., Молчанов В.П. и др. // Тихоокеан. геология. 2007. Т. 26. № 1. С. 70–80.
3. Мишкин М.А., Ханчук А.И., Журавлев Д.З. и др. // ДАН. 2000. Т. 374. № 6. С. 813–815.
4. Ханчук А.И., Молчанов В.П., Медведев Е.И. и др. В кн.: Наногеохимия золота. Владивосток: Дальнаука, 2008. С. 33–36.
5. Плюснина Л.П., Кузьмина Т.В., Авченко О.В. // Геохимия. 2004. № 8. С. 864–873.
6. Наноминералогия / Под ред. Н.П. Юшкина, А.М. Асхабова, В.Н. Ракина. СПб.: Наука, 2005. 577 с.
7. Меретуков М.А., Орлов А.М. Металлургия благородных металлов. Зарубежный опыт. М.: Металлургия, 1991. 415 с.